

**Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta
Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky**

**Charles University, Faculty of Science
Institute of hydrogeology, engineering geology and applied geophysics**

Doktorský studijní program: Aplikovaná geologie
Doctoral study programme: Applied geology

Autoreferát disertační práce
Summary of the Doctoral thesis



Automatické zpracování mikroseismických dat a jejich vztah k hydraulické
injektáži
Automatic processing of microseismic data and their relation to the hydraulic
injection

Mgr. Josef Vlček

Školitel/Supervisor:

Prof. RNDr. Tomáš Fischer, Ph.D.

Praha, 6.10. (2020)

Abstrakt

Mikroseismické monitorování je nedílnou součástí vědeckých experimentů nebo průmyslových operací spojených s hydraulickým štěpením hornin pod zemským povrchem, za kterým stojí snaha dosáhnout zvýšení permeability hornin v daném místě a zlepšit tak výtěžnost, ať už tepla, případně ropy či zemního plynu. Monitoring takto nově vzniklých nebo rozrůstajících se původních trhlin, projevujících se seismickými jevy, je velmi důležitý pro sledování a popsání samotného hydraulického štěpení a jeho postupu v čase. Vzhledem k tomu, že počet takto zaznamenaných jevů je obvykle velmi vysoký, klasické metody zpracování zemětřesení, kdy se časy příchodů seismických vln určují manuálně, se jeví jako velmi nevhodné. Z toho důvodu jsou pro zpracování takovýchto datových souborů používány metody automatické, které manuální určování časů příchodů vln nevyžadují. V našem případě byla data zaznamenávána hustou sítí povrchových přijímačů rozmístěných do tvaru hvězdice o deseti ramenech. Jednalo se celkem o devět set grup vertikálních geofonů, z nichž více než čtvrtina byla doplněna také tříoskovým seismickým snímačem. Pro popsanou síť jsme pak vytvořili automatickou proceduru, jejímž výsledkem je určení polohy ohniska a také zdrojového mechanismu pro každý jev. Zaznamenané otřesy byly následně v rámci interpretace porovnávány v čase s množstvím injektované kapaliny. Ta byla proveden formou vzájemné korelace množství zaznamenaných otřesů a objemu kapaliny injektovaného do vrtu. Do této části práce byly pro ověření funkčnosti metodiky přidány další dvě podobné datové sady. Celý proces zpracování a následné interpretace dat bude čtenářům popsán v textu této disertační práce.

Abstract

Microseismic monitoring is an integral part of scientific experiments or industrial operations associated with the hydraulic fracturing of bedrock, which is an effort to increase the permeability of rocks in the area and improve the exploitation, whether of heat, oil or natural gas. Monitoring of such newly formed or growing original fractures, usually followed by seismic events, is very important for observation and describing the hydraulic fracturing itself and its progress over time. Since the number of such events recorded is usually very high, classical methods of earthquake processing, where the arrival times of seismic waves are determined manually, seem to be very inappropriate. For this reason, automatic methods are used to process such datasets, which do not require manual determination of the arrival times of the seismic waves. In our case, the data were recorded by a dense network of surface receivers arranged in the shape of a ten-arm star. It was a total of more than nine hundred groups of vertical geophones, of which more than a quarter were also supplemented by a three-component seismic sensor. We then created an automatic procedure for the described network, the result of which is the determination of the location and the source mechanism for each seismic event. The recorded earthquakes were then compared over time with the amount of fluid injected. This was done in the form of a cross-correlation between the recorded seismicity and the amount of water injected into the well. Two more data sets were added to this part of the work to verify the functionality of the methodology. The whole data processing and subsequent interpretation will be described in the text of this doctoral thesis.

Obsah / Summary

1.	Úvod	1
2.	Cíle práce	2
3.	Materiál a metodika	2
3.1.	Určení polohy ohniska	2
3.2.	Určení ohniskového mechanismu	5
3.3.	Korelace seismických a hydraulických dat	5
4.	Výsledky a diskuse	6
4.1.	Určení polohy ohniska	6
4.2.	Určení ohniskového mechanismu	8
4.3.	Korelace seismických a hydraulických dat	9
5.	Závěry	11
1.	Introduction	12
2.	Aims of the study	13
3.	Material and methods	13
3.1.	Localization of the seismic event	13
3.2.	Focal mechanism estimation	16
3.3.	Cross-correlation of seismic and hydraulic data	16
4.	Results and discussion	17
4.1.	Localization of the seismic event	17
4.2.	Focal mechanism estimation	19

4.3.	Cross-correlation of seismic and hydraulic data	20
5.	Conclusions	22
6.	Použitá literatura / References	23
	Životopis / Curriculum vitae	25
	Seznam publikací / List of publications	29

1. Úvod

Zemětřesení jako důsledek průmyslové či jiné lidské činnosti mají mnoho různých označení: lidská (manmade), antropogenní (anthropogenic), umělá (artificial), indukovaná (induced) nebo spouštěná (triggered). Někteří vědci navrhují, aby se tato zemětřesení klasifikovala na fyzikálním základě jako indukovaná (induced), pokud lidský zásah způsobí změnu napětí, která je srovnatelná se střížným napětím na zlomu, které způsobí výsledný skluz a tím i otřes. Jako další kategorii pak navrhují jevy spouštěné (triggered), kde změna napětí vyvolaná lidskou činností je jen malým zlomkem celkově uvolněného napětí (Bossu et al., 1996; McGarr & Simpson, 1997). Bohužel vědecká literatura nebyla v používání těchto výrazů nikdy zcela konsistentní a v mnoha případech by tak běžně označovaná indukovaná seismická měla být podle výše uvedené definice označována jako spouštěná (triggered) (McGarr et al., 2002). Právě rozložení přírodního a antropogenního napětí není přesně známo, což také komplikuje odlišení těchto dvou druhů seismicity. Navíc veřejné vnímání a právní pohled na toto rozdělení nejsou zcela relevantní a vedou spíše k dalšímu zmatení celé situace. V seismologii se již od prvních zaznamenaných indukovaných jevů řeší, jak rozeznat seismicitu přírodní a uměle vyvolanou. Pro tyto účely vzniklo mnoho různých metod zkoumajících časové, prostorové a další závislosti obou typů seismicity. Kromě těchto údajů vstupují do výpočtů také data o časovém průběhu nebo celkovém množství injektovaných kapalin, polohách injektážních vrtů nebo jejich hloubkách. Všechny tyto parametry pak mohou sloužit k rozlišení přírodní a indukované seismicity, ale zároveň také k určení potenciálního seismického ohrožení již před začátkem samotné hydraulické injektáže (Davis & Frohlich, 1993). Obecně vzniká seismická při podzemních činnostech, jako je těžba nebo ražení štol, při napouštění přehrad a zejména pak při podzemní činnosti spojené se štěpením hornin vodou nebo jinými fluidy. Pojem „mikroseismická“ se v literatuře začal objevovat v 80. letech, kdy vylepšené přístrojové vybavení umožňovalo detekci stále slabších otřesů. Takovéto seismické jevy se pak používaly pro monitoring přírodních i antropogenních aktivit, které často byly spjaté s pohybem různých fluid. Jde například o antropogenní hydraulické štěpení krystalických hornin (House, 1987; Sasaki, 1998) nebo experimenty se štěpením sedimentárního ložiska uhlovodíků (Ruttledge et al., 2004). Týká se to také pozorování přírodní aktivity – například vulkánů a vulkanických oblouků (Bohnhoff et al., 2006) včetně snahy o detekci intruzivního pohybu magmatu (Gambino et al., 2004) a je možné sledovat i mikroseismické projevy pohybu ledovců (West et al., 2010).

2. Cíle práce

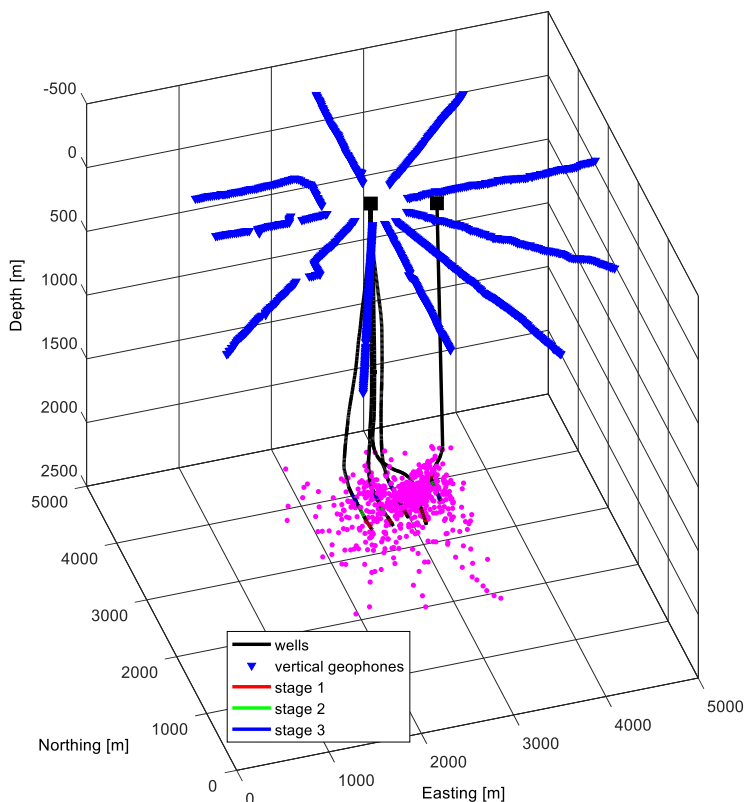
Cílem této disertační práce bylo vyvinout a otestovat metodiku automatického určení poloh ohnisek seismických jevů a také jejich ohniskových mechanismů, za pomoci metody sčítání seismogramů a jejich charakteristických funkcí určených ze seismických dat zaznamenaných hustou povrchovou sítí přijímačů. Výsledky tohoto zpracování dat jsou následně porovnány s odlišnou automatickou metodou, která byla aplikována na stejnou datovou sadu, za účelem ověření funkčnosti níže představené metodiky. V další části práce je cílem práce ověřit možnost použití takto detekovaných seismických jevů pro interpretaci, při níž je porovnáván časový průběh seismicity s množstvím kapaliny injektované do vrtu. Pro lepší ověření výsledků je v tomto případě použita ještě jedna podobná datová sada z hydraulické stimulace břidlic a také jedna sada odlišná, obsahující vliv změny vodní hladiny v přehradě na blízkou seismicitu.

3. Materiál a metodika

3.1. Určení polohy ohniska

První část disertační práce popisuje metodiku automatického zpracování seismických dat zaznamenaných hustou sítí povrchových přijímačů, které byly rozloženy na povrchu během hydraulického štěpení podloží (Obrázek 1). Tato data se skládala z vertikálních geofonových grup (celkem 911) rozmístěných do deseti ramen hvězdy, kde čtyři hlavní ramena této hvězdy (směr S-J a V-Z) byla navíc osazena i tříslůžkovými snímači (celkem 271).

Takto velké množství dat bylo zpracováno automaticky za pomoci metodiky, kterou jsme sami vyvinuli a otestovali. Jedná se o postup stávající ze dvou kroků, kdy v prvním kroku je určena poloha ohniska daného jevu a v druhém kroku pak také příslušný ohniskový mechanismus. Původní plán byl určovat oba parametry najednou, ale rozdělení na dva kroky výrazně snížilo výpočetní náročnost celého procesu. Datový soubor obsahoval kromě několika hodin kontinuálního seismického záznamu také 34 známých a již zpracovaných otřesů, které jsme použili jako etalon pro ověření funkčnosti naší metodiky zpracování. Lokace těchto jevů byly určeny pomocí automatické metody DSMTI (Diffraction stacking moment tensor inversion, Anikiev et al., 2014) a jejich ohniskové metody pak pomocí inverze plných momentových tenzorů z manuálně odečtených prvních nasazení P-vln (Staněk et al., 2014). Výsledky jsou porovnány níže v tomto textu.



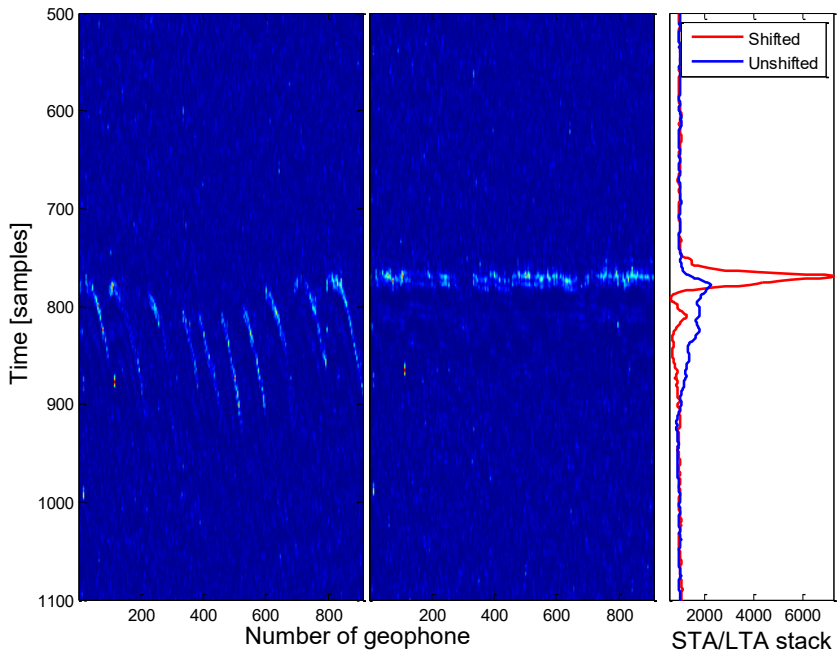
Obrázek 1 - 3-D pohled na seismickou síť (modré trojúhelníky) včetně trajektorií vrtů (černé čáry), jejich štěpených úseků (červená, zelená a modrá sekce v horizontální části vrtů) a vybraných detekovaných seismických jevů (fialové body).

Pro zpracování tohoto souboru dat byla použita migrační metodika podobná metodě NMO (normal move-out) známé z aktivního seismického průzkumu (Yilmaz, 2001). Ta slouží k opravě časů příchodu na snímač vlivem odlišné horizontální vzdálenosti od seismického zdroje. Adaptací této metody na pasivní seismická data je oprava dat na čas průchodu seismické vlny prostředím mezi zdrojem a přijímačem a následný součet všech tras, které by se pro ideálně nalezenou polohu zdroje měli srovnat do přímky, jak ukazuje Obrázek 2.

Tento postup byl v našem případě aplikován na matici časů průchodu na jednotlivé stanice z podpovrchové sítě bodů o počtu 91x91x31 s rozestupy bodů 75 stop (22.86

metrů). Tyto body sloužily jako potenciální ohniska jevů a byly testovány metodou síťového přebírání se zaostřováním, kdy první průchod prohledávanou sítí byl veden s větším krokem a následně se síť zmenšovala kolem vybraného nejlepšího ohniska. Tento zaostřovací proces byl opakován čtyřikrát a výsledný výpočetní čas byl díky tomu zkrácen až o 90 %.

Ještě před samotným sčítáním byly seismické trasy převedeny na nezápornou charakteristickou funkci, která měla za cíl zlepšení poměru signálu ku šumu, ale také zamezení odčítání seismických tras s opačnou polaritou příchodu na seismickou stanici. Po testování různých funkcí byl nakonec jako nejvhodnější z hlediska výsledků i výpočetního výkonu vybrán poměr STA/LTA (short-time average/long-time average), neboli poměr průměrů počítaných v oknech dvou různých délek (Obrázek 2). Do většího detailu je ten postup popsán v práci Vlček et al., 2016.

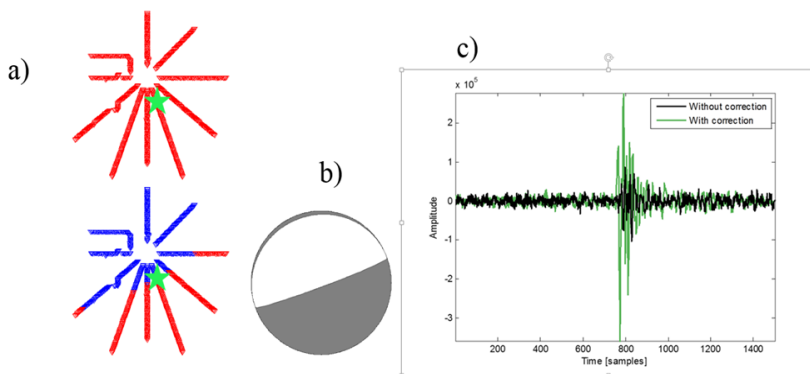


Obrázek 2 – Seismická data zaznamenaná na 911 přijímačích před posunem do ohniska (vlevo). Data posunutá v čase do optimálního ohniska (uprostřed). Vpravo porovnání součtové STA/LTA trasy pro levý (modrá křivka) a prostřední panel (červená křivka).

3.2. Určení ohniskového mechanismu

Druhým krokem v první části disertační práce bylo určování ohniskového mechanismu seismického jevu. To bylo provedeno taktéž za pomoci síťového prohledávání prostoru, v tomto případě byl ale prohledáván prostor úhlů strike, dip a rake, jejichž pomocí je také možné mechanismus vyjádřit. Kromě těchto úhlů do výpočtu vstupují ještě úhel východu paprsku ze zdroje a azimut zdroje, které byly spočteny pro známou polohu jevu a každou stanici zvlášť.

Úhly strike, dip a rake byly cyklicky měněny, každý ve svém plném rozsahu, a byla dopočítávána vyzařovací charakteristika P-vln. Na základě jejich odlišných hodnot pro každou stanici pak byly přenášobeny amplitudy seismických signálů a ty byly následně sečteny do jedné trasy. Optimální kombinace hodnot tří zmíněných úhlů pak měla za následek nejlepší součet, jak je patrné z Obrázek 3. Stejně jako v případě určení polohy ohniska je i tento postup detailně popsán v práci Vlček et al., 2016.



Obrázek 3 – a) nahoře – polarity bez zavedení opravy, dole – polarity pro optimální mechanismus, b) – stereografická projekce optimálního mechanismu, c) černě neopravená součtová trasa, zeleně součtová trasa opravená pro optimální mechanismus.

3.3. Korelace seismických a hydraulických dat

V druhé části této práce byla seismická data interpretována, a to formou vzájemné korelace s daty hydraulickými, která má za úkol sledovat reakci horninového masivu na hydraulické štěpení. Pro tuto část práce byly kromě výše uvedené datové sady použity další dvě – jedna také obsahovala hydraulické štěpení břidlic na zemní plyn,

ale z jiné lokality. Poslední datová sada pak obsahovala seismicitu nedaleko vodní nádrže Pertusillo na jihu Itálie a změny její vodní hladiny (Stabile et al., 2015).

Před samotnou vzájemnou korelací byla všechna data shodně upravena tak, aby hydraulická i seismická data byla vzájemně porovnatelná. Nejprve byly hodnoty počtu seismických jevů a také injektovaného množství posčítány do časových oken o stejné délce, pro sjednocení vzorkovací frekvence dat. Samotná délka časového okna se lišila pro každou datovou sadu, v závislosti na celkové délce dostupných dat. Od křivek s daty posčítanými do jednotlivých oken byl následně odečten jejich klouzající průměr. Tato úprava měla za cíl, aby křivky neměly pouze kladné hodnoty, ale také záporné. Korelování křivek s pouze kladnými hodnotami obecně vede k vysokým hodnotám koeficientu korelace a může také maskovat opravdový vzájemný vztah porovnávaných veličin. Kromě samotné hodnoty maxima korelační funkce je pro závěrečnou interpretaci použito také zpoždění tohoto maxima. Více detailů je k nalezení v práci Vlček et al., 2018.

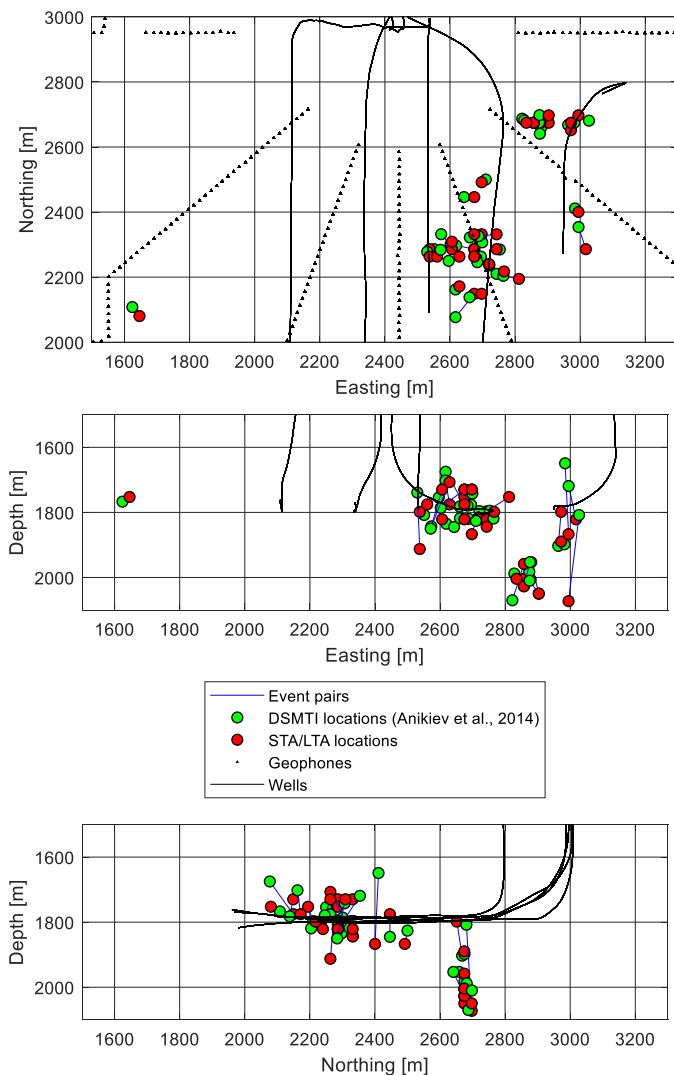
4. Výsledky a diskuse

4.1. Určení polohy ohniska

Představená metodika určování polohy ohniska byla porovnávána na 34 testovacích jevech ze stejné datové sady, které byly zároveň lokalizovány metodou DSMTI (Diffraction stacking moment tensor inversion, Anikiev et al., 2014). Výsledné porovnání je vyobrazeno na Obrázek 4, je patrné, že odchylky nejsou příliš velké, zejména v horizontální rovině. Ve vertikálním směru už jsou rozdíly mezi výsledky výrazně vyšší, maximální odchylka ve vertikálním směru činila 125 metrů. To je hodnota, která se stále pohybuje v rámci oblasti nad 95 % maxima součtu ve vertikálním směru. Z toho je patrné, že přesné určení polohy ohniska ve vertikálním směru je u čistě povrchové sítě zatíženo velkou nejistotou.

Z těchto výsledků je patrné, že naše metodika je schopna s dostatečnou přesností a také rychle určit polohu ohniska i velmi slabého seismického jevu zaznamenaného na takovéto síti přijímačů.

Jelikož naše metodika pro určení polohy ohniska využívá parametr STA/LTA, který je běžně v seismologii využíván pro detekci jevů, byla na kontinuálních datech také otestována pro tento účel. Výsledkem bylo téměř 150 detekovaných jevů v pouhých 4 hodinách kontinuálního záznamu. Navíc i polohy ohnisek odpovídaly oblasti vrtu, která byla v daném období štěpena. Své využití tedy představená metodika může po drobných úpravách najít i zde.

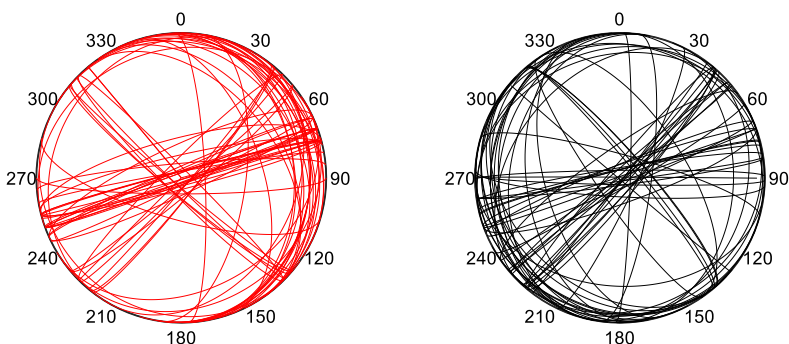


Obrázek 4 - Porovnání výsledných lokací, naše metodika aplikovaná na data "D" – pouze vertikální geofony (červená), oproti tomu výsledky získané metodou DSMTI (Anikiev et al., 2014). Příslušné jevy spojeny modrou čarou.

4.2. Určení ohniskového mechanismu

Na totožné sadě 34 testovacích jevů byly kromě výsledných lokací porovnávány také ohniskové mechanismy. Výsledky získané naší metodikou byly v tomto případě porovnávány s mechanismy, které byly určeny inverzí plného momentového tenzoru z ručně určených polarit prvního nasazení P-vln (Staněk et al., 2014). Výsledky by se daly rozdělit na dvě části podle převažujícího mechanismu jevů (Obrázek 5). První kategorií byly dip-slip jevy, které převládaly (26 z 34) a v jejich výsledcích je patrná největší odlišnost – směr striku. Zatímco výsledky z plného momentového tenzoru celkem jasně vymezují strike těchto jevů cca 70° , výsledky naší metodiky jsou rozptýlené od 50° až po 90° . Příčinou této nepřesnosti je zřejmě slabý seismický signál na stanicích v okolí jediné nodální roviny, která v tomto případě protíná seismickou síť. Ani po opravě na vyzařovací charakteristiku nedojde k zcela přesnému určení azimutu nodální roviny, neboť slabé signály kolem ní jsou počítány náhodně. Tento jev je však lepší pro druhou skupinu, která měla mechanismy typu strike-slip (8 z 34). Ačkoli v tomto případě povrchovou síť protínají obě nodální roviny, což zeslabuje signál na více stanicích, vede to k lepšímu určení obou nodálních rovin a menším vzájemným odchylkám do 10° . Tento paradox je zřejmě určen lepším prostorovým vymezením polarit na stanicích vzdálenějších od obou nodálních rovin.

Celkově je možné říct, že určení ohniskového mechanismu neprokázalo takovou přesnost jako určení samotné polohy ohniska. Nicméně jako rychlý odhad orientace nodálních rovin jevu může sloužit velmi dobře.

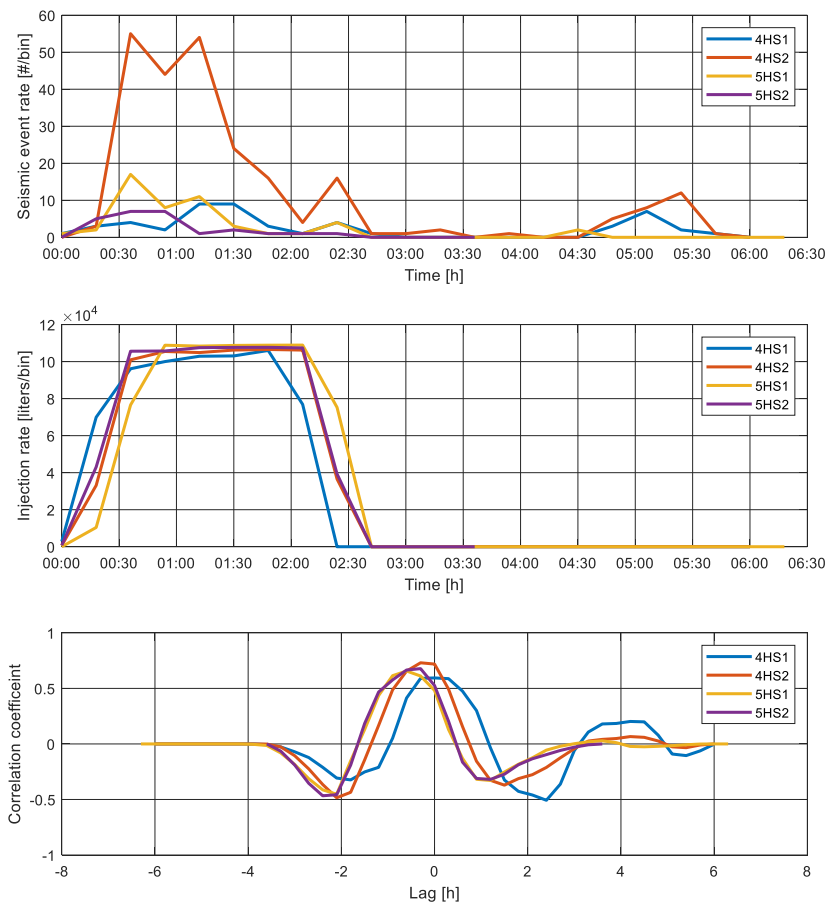


Obrázek 5 - 34 mechanismů podle Staněk et al., 2014 (vlevo) vs. mechanismy získané naším zpracováním (vpravo).

4.3. Korelace seismických a hydraulických dat

Korelace seismických a hydraulických dat byla použita jako interpretační krok, ve kterém získaná seismická data použijeme ke sledování odezvy horninového prostředí na injektáž. Tento postup byl testován na dvou datových sadách s hydraulickým štěpením, kde si dosažené výsledky byly velmi podobné. Proto jsou zobrazeny pouze výsledky pro datovou sadu shodnou s první částí disertační práce (Obrázek 6). Obě tyto sady vykazovaly ve většině případů velmi malá kladná a někdy dokonce i záporná zpoždění seismických dat za injektáží. Toto chování odpovídá okamžité odezvě horninového prostředí na injektáž – pokles injektáže tak znamená okamžité mizení seismických jevů a nedochází k aktivaci žádného napětí nahromaděného na existujícím zlomu. Našly se však i injektáže, kde zpoždění seismicity bylo více než hodinu po injektáži (fáze 5HS1, Obrázek 6). Takovýto případ by již mohl vypovídat o uvolňování energie na přírodním zlomu, ale v tomto konkrétním případě šlo pouze o 25 seismických jevů pozorovaných během několika hodin. Druhá datová sada tvarem i zpožděním maxima korelační funkce odpovídala datům na Obrázek 6, ale dosahovala ještě vyšších koeficientů korelace až kolem 0.9. Třetí datová sada korelující hladinu vody v přehradní nádrži a blízkou seismicitu trpěla bez úprav silnou periodicitou signálu spojenou s pravidelnou změnou vodní hladiny v nádrži. Po zprůměrování pozorovaného období 10 let do 1 roku došlo k odstranění tohoto artefaktu, nicméně koeficient korelace jen těsně překročil hodnotu 0.4 a navíc korelační funkce měla dvě velmi podobná maxima na zpožděních 0 a 28 dní. Je tedy patrná souvislost mezi hladinou vody v nádrži a blízkou seismicitou, ale je těžké rozhodnout s jakým zpožděním se napětí z přehrady přeneslo do oblasti vzniku otřesů.

Korelace hydraulických dat se seismickými se ukázala jako jedna z možností, jak sledovat odezvu horninového prostředí a také ocenit množství uvolněné energie a případné ohrožení majetku a životů na povrchu v případě pokračující injektáže.



Obrázek 6 – Výsledné korelační křivky pro seismicitu a hydraulickou injektáž, různé fáze injektáže (viz legenda v jednotlivých panelech). Spodní panel znázorňuje korelace seismické (horní) a hydraulické (prostřední) křivky po odečtení klouzavých průměrů (na panelech nakresleno před jejich odečtením).

5. Závěry

V představené disertační práci se podařilo vytvořit funkční metodiku pro automatické zpracování seismických dat z husté sítě povrchových přijímačů, detekované a lokalizované jevy bylo následně možné použít pro interpretaci vlivu hydraulického štěpení na horniny. Celý postup tak pokrývá důležité technické i právní téma zkoumání zavinění případných hmotných škod, které by mohly vzniknout při silnějších otřesech způsobených injektáží.

První část zpracování, kdy byla určována poloha ohniska osvědčilo velkou přesnost, srovnatelnou s jinými metodami, i pro velmi slabé seismické jevy. O něco horší situace pak byla u určení ohniskového mechanismu pro takové zemětřesení. Zde již slabý seismický signál znemožnil automaticky určit zcela přesný ohniskový mechanismus. Navíc musíme brát v potaz, že naše metoda určování mechanismu používala řadu zjednodušení, která vedou k menší přesnosti výsledku.

V druhé části práce, tedy interpretace, byla využita korelace mezi seismickými a hydraulickými daty pro popis reakce horninového podloží na hydraulickou stimulaci. Tato metoda se ukázala jako jednoduchý a efektivní způsob ocenění vlivu injektáže a stanovení případné pokračující seismicity při aktivaci napětí na zlomu. Může tak být součástí dnes oblíbených „traffic light system“ neboli systémů řízení hydraulických stimulací, které mají za úkol hlídat seismicitu a při vyšším riziku výskytu silných otřesů omezit injektáž, aby se předešlo škodám na majetku či lidském zdraví.

1. Introduction

Earthquakes as a result of industrial or other human activity have many different designations: human (manmade), anthropogenic, artificial, induced or triggered. Some scientists suggest these earthquakes to be classified as induced on a physical basis if human intervention causes a stress change that is comparable to the shear stress at the fracture that causes the resulting slip and thus earthquake. As another category, they suggest triggered events, where the change in stress caused by human activity is only a small fraction of the total stress released (Bossu et al., 1996; McGarr & Simpson, 1997). Unfortunately, the scientific literature has never been completely consistent in the use of these terms, and in many cases, it is commonly referred to induced seismicity where should be triggered by the above definition (McGarr et al., 2002). The true distribution of natural and anthropogenic stress is not exactly known, which also complicates the distinction between these two types of seismicity. Moreover, the public perception and legal view of this task are not entirely relevant and rather lead to further confusion of the whole situation. In seismology, from the first recorded induced phenomena, the solution of natural and artificial seismicity is solved. For these purposes, many different methods have emerged to examine the temporal, spatial and other dependences of these types of seismicity. In addition to seismic data, data on the injection rate or total amount of injected fluids, positions of injection wells or their depths are also included in the calculations. All these parameters can be used to distinguish between natural and induced seismicity, but also to determine the potential seismic hazard before the start of the hydraulic injection itself (Davis & Frohlich, 1993). In general, seismicity occurs during underground activities, such as mining or excavation of galleries, filling dams, and especially during underground activities associated with the fracturing of rocks with water or other fluids. The term "microseismicity" began to appear in the literature in the 1980s, when improved instrumentation made it possible to detect increasingly weak shocks. Such seismic events are then used to monitor natural and anthropogenic activities, which are often associated with the movement of various fluids. These include anthropogenic hydraulic fracturing of crystalline rocks (House, 1987; Sasaki, 1998) or experiments with stimulation of a sedimentary hydrocarbon deposit (Ruttledge et al., 2004). This also applies to the observation of natural activity - for example volcanoes and volcanic arches (Bohnhoff et al., 2006), detection of intrusive magma movement (Gambino et al., 2004), and it is possible to observe also microseismic manifestations of glacier movement (West et al., 2010).

2. Aims of the study

The aim of this thesis is to develop and test a methodology for automatic determination of focal positions of seismic events and their focal mechanisms, using the method of stacking seismograms and their characteristic functions determined from seismic data recorded by a dense surface network of receivers. The results of this data processing are then compared to a different automatic method, which is applied to the same data set, in order to verify the functionality of the methodology presented below. In the second part of the work, the aim is to verify the possibility of using such detected seismic events for interpretation, in which the temporal scatter of seismicity is compared with the amount of liquid injected into the well. In order to verify the results, another similar data set from hydraulic stimulation of gas shales is used. Also, different data set containing the effect of the change of the water level in the dam on the nearby seismicity is used in this part of the thesis.

3. Material and methods

3.1. Localization of the seismic event

The first part of this doctoral thesis describes the methodology of automatic processing of seismic data recorded by a dense network of surface receivers, which were distributed on the surface during the hydraulic fracturing for shale gas (Figure 1). These data consisted of vertical geophone groups (911 in total) distributed in ten arms of the star, where the four main arms of this star (direction N-S and E-W) were also equipped with three-component sensors (271 in total).

Such a large amount of data was processed by automatic methodology that we developed and tested on the mentioned data set. This procedure consists of two steps, where in the first step the location of the seismic event is determined and in the second step also the relevant focus mechanism is estimated. The original plan was to determine both parameters at once, but the division into two steps significantly reduced the computational time of the whole process. Data set included several hours of continuous seismic records and 34 processed (location and focal mechanism) seismic events, which we used as a standard to verify the functionality of our methodology. The locations of these 34 events were determined using the automatic DSMTI method (Diffraction stacking moment tensor inversion, Anikiev et al., 2014) and their focal mechanisms using the inversion of full moment tensors from manually picked P-wave arrivals (Štaněk et al., 2014). The results are compared below in this text.

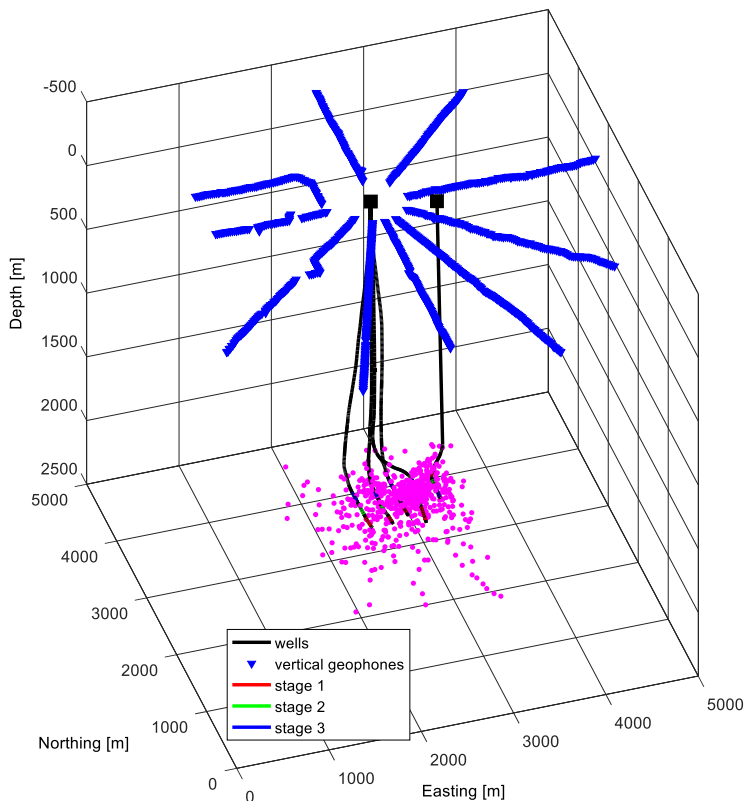


Figure 1 - 3-D view of the seismic network (blue triangles) including borehole trajectories (black lines), their fracturing sections (red, green and blue line in the horizontal part of the boreholes) and selected seismic events (purple dots).

A migration methodology similar to the NMO (normal move-out) method known from active seismic survey was used to process this data set (Yilmaz, 2001). This method corrects the arrival time to the sensor due to the different horizontal distance from the seismic source. By adaptation of this method to passive seismic data we correct the data for the travel time of the seismic wave between the source and receiver and then subsequently stack of all traces that should be aligned in a straight line for an optimal source position (Figure 2).

In our case, this procedure was applied to a matrix of travel times to individual stations from a subsurface network of 91x91x31 points with spacing of points 75 feet (22.86

meters). These points were potential locations of the events and were tested by the method of grid search with focusing, where the first pass through the searched network was conducted with a larger step and then the network shrank around the selected best result. This focusing process was repeated four-times and the resulting computational time was reduced by up to 90%.

Even before the stacking itself, the seismic traces were converted into a non-negative characteristic function, which aimed to improve the signal-to-noise ratio, but also to prevent the subtraction of seismic routes with the opposite polarity of arrival at the seismic station. After testing the various functions, the STA / LTA (short-time average / long-time average) ratio, or the ratio of the averages calculated in windows of two different lengths, was finally chosen as the most suitable in terms of quality of results and computational time (Figure 2). The procedure is described in more detail in article Vlček et al., 2016.

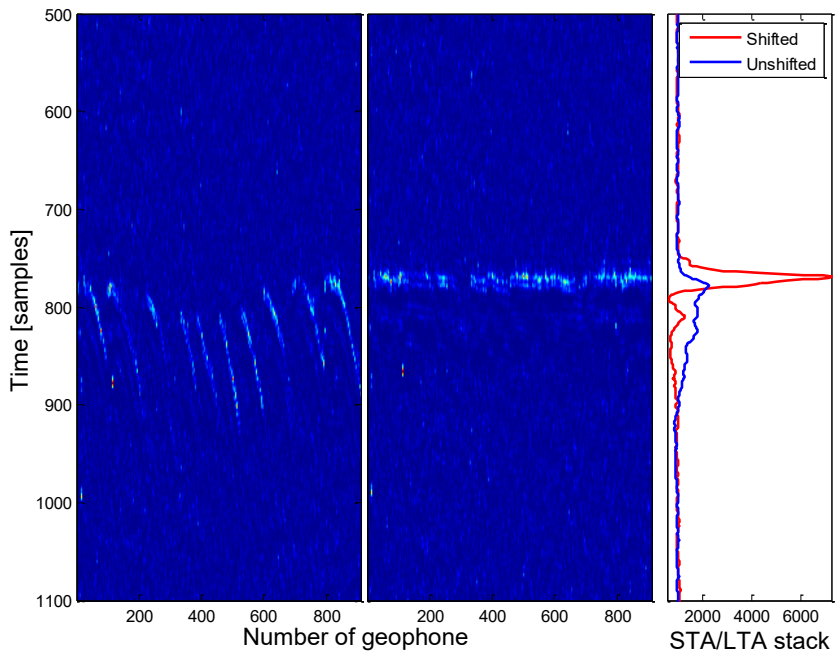


Figure 2 - Seismic data recorded on 911 receivers before shifting in time to the optimal location (left). Data shifted in time to the optimal location (middle). Comparison of the stacked STA / LTA trace for the left (blue curve) and middle panel (red curve).

3.2. Focal mechanism estimation

The second step after determination of event location was to estimate the focal mechanism of the earthquake. This was also done with the help of a grid search, but in this case the space of strike, dip and rake angles was searched. These angles allow us then to express resulting focal mechanism. Two more angles also enter the calculation - the angle of depart of the seismic ray from the source and the azimuth of the source, which have been calculated for the known position of the event and each station separately.

The strike, dip and rake angles were cyclically changed, each one to its full extent, and the radiation pattern of the P-waves was calculated. Based on its different value for each station, the amplitudes of the seismic signals were then multiplied, and these were then stacked into one path. The optimal combination of the values of the three mentioned angles then resulted in the best stack, as can be seen from Figure 3. As in the case of determining the location of the event, this procedure is described in more detail in article Viček et al., 2016.

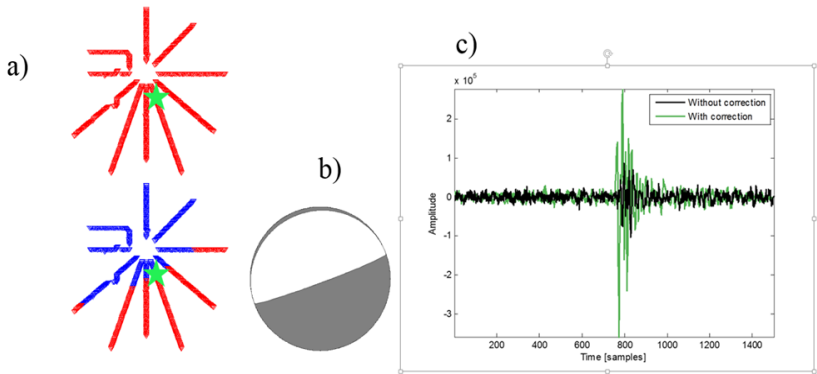


Figure 3 - a) top - polarities without correction, bottom - polarities for the optimal focal mechanism, b) – stereographic projection of the optimal mechanism, c) trace before (black) and after correction for optimal focal mechanism (green).

3.3. Cross-correlation of seismic and hydraulic data

In the second part of this thesis, seismic data were interpreted in the form of cross-correlation with hydraulic data, which should work as a monitor of the response of the rock mass to hydraulic fracturing. In addition to the above data set, two more were used

for this part of the work - one also included hydraulic fracturing of shales for natural gas, but from a different location. The last data set then included seismicity near the Pertusillo lake in southern Italy and changes in its water level (Stabile et al., 2015). Prior to the cross-correlation, all data were uniformly adjusted so that the hydraulic and seismic data were mutually comparable. First, the values of the number of seismic events and the amount injected water (or water level) were summed into time windows of the same length, to unify the sampling frequency of the data. The length of the time window itself differed for each data set, depending on the total length of available data. The moving average was then subtracted from the resulting curves. The aim of this adjustment was that the curves not only had positive values but also negative ones. Correlation of curves with only positive values generally leads to high values of the correlation coefficient and can also mask the true relationship between the quantities being compared. In addition to the value of the maximum of the correlation function itself, the delay of this maximum is also used for the final interpretation. More details can be found in article Vlček et al., 2018.

4. Results and discussion

4.1. Localization of the seismic event

The presented methodology of determining the event location was compared on 34 test weak earthquakes from the same data set, which were also localized by the DSMTI method (Diffraction stacking moment tensor inversion, Anikiev et al., 2014). The resulting comparison is shown in Figure 4. The deviations are not large, especially in the horizontal plane. In the vertical direction, the differences between the results are significantly higher, the maximum deviation in the vertical direction was 125 meters. This is a value that is still within the region above 95% of the maximum stack in the vertical direction. This shows that determination of seismic event depth is always the biggest challenge for a surface network of receivers.

Our methodology showed that it is able to accurately and quickly determine the location of a very weak seismic event recorded on such a network of receivers.

Since our methodology for localization uses the parameter STA / LTA, which is commonly used in seismology for the detection of events, it was also tested on continuous data for this purpose. The result was almost 150 detected events in just 4 hours of continuous record. In addition, the locations of these events corresponded to the area of the well that was fractured in the given time period. The introduced methodology can therefore find its use here after minor modifications.

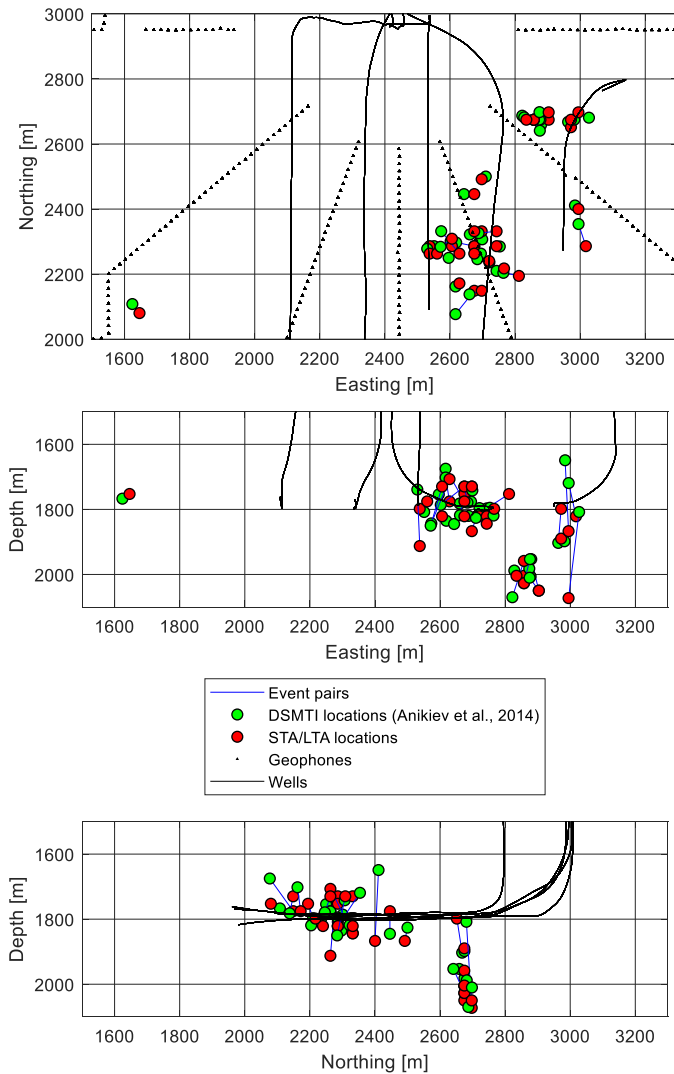


Figure 4 - Comparison of the resulting locations, our methodology applied to the “D” data - only vertical geophones (red), in contrast to the results obtained by the DSMTI method (Anikiev et al., 2014). Relevant events connected by a blue line.

4.2. Focal mechanism estimation

In addition to the resulting locations, focal mechanisms were also compared on an identical set of 34 test phenomena. In this case, the results obtained by our methodology were compared with the mechanisms that were determined by the inversion of the full torque tensor from the manually determined polarities of the first deployment of P-waves (Staněk et al., 2014). The results could be divided into two parts according to the predominant mechanism of event (Figure 5). The first category was the dip-slip mechanism that prevailed (26 of 34) and in their results the biggest difference is evident - the direction of strike. While the results from the full moment tensor quite clearly define the strike of these events of about 70° , the results of our methodology are scattered from 50 to 90° . The cause of this inaccuracy is probably a weak seismic signal at stations around a single nodal plane, which in this case intersects the seismic network. Even after the correction of the radiation pattern, the azimuth of the nodal plane is not determined accurately, because the weak signals around it are stacked randomly. However, this phenomenon is better for the second group of events, which had strike-slip mechanisms (8 of 34). Although in this case the surface network is intersected by both nodal planes, which attenuates the signal at more stations, this leads to a better determination of both nodal planes and smaller strike deviations up to 10° . This paradox is probably determined by a better spatial delimitation of polarities at stations farther from both nodal planes.

Overall, we can state that the determination of the focal mechanism did not prove as accurate as the determination of the location itself. However, it can serve very well as a quick estimate of the orientation of the nodal planes of the earthquake.

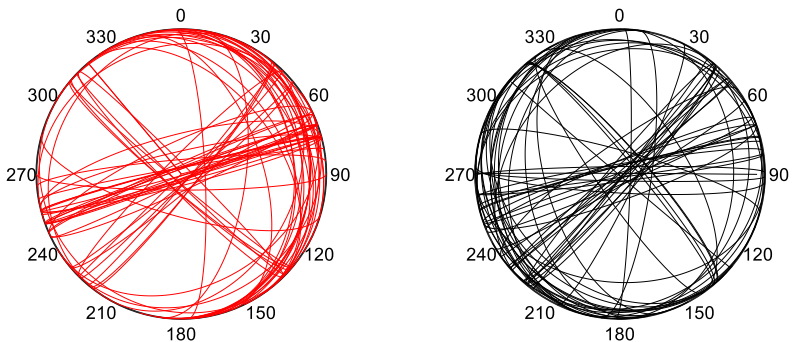


Figure 5 - 34 mechanisms according to Staněk et al., 2014 (left) vs. mechanisms obtained by our processing (right).

4.3. Cross-correlation of seismic and hydraulic data

The cross-correlation of seismic and hydraulic data was used as an interpretive step in which the obtained seismic data are used to observe the response of the rock mass to injection. This procedure was tested on two data sets with hydraulic fracturing, where the results obtained were very similar. Therefore, only the results for the data set identical to the first part of the thesis are displayed (Figure 6). Both sets showed in most cases very small positive and sometimes even negative delays of seismic data after injection. This behavior corresponds to the immediate response of the rock environment to hydraulic stimulation - a decrease in injection thus means the immediate disappearance of seismic events and does not activate any stress accumulated at the existing fractures. However, there were also some stimulation phases found where the seismicity delay was more than an hour after injection (stage 5HS1, Figure 6). Such a case could already indicate a release of energy at a preexisting fault, but in this case, it was only 25 seismic events observed in a few hours. The second data set in shape and delay of the maximum of the correlation function corresponded to the data in Figure 6 but achieved even higher correlation coefficients up to around 0.9. The third data set, which correlated the water level in the water reservoir and the nearby seismicity, suffered without modification from the strong periodicity of the signal associated with the seasonal change of the water level in the reservoir. After averaging the observed period of 10 years to 1 year, this artifact was removed, however, the correlation coefficient only narrowly exceeded 0.4, and in addition, the correlation function had two very similar maxima on delays of 0 and 28 days. Thus, the connection between the water level in the reservoir and the nearby seismicity is obvious, but it is difficult to decide with what delay the stress from the dam is transferred to the area of shocks. The correlation of hydraulic data with seismic data proved to be one of the ways to monitor the response of the rock mass and also to assess the amount of energy released and the potential threat to property and life on the surface in the event of ongoing injection.

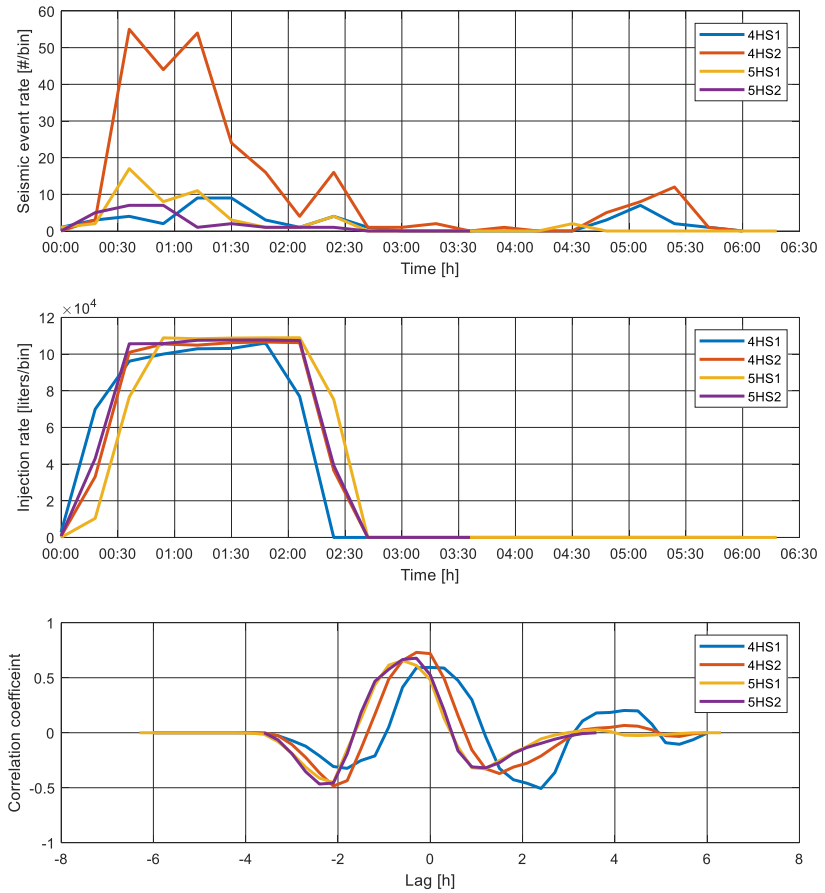


Figure 6 - Resulting correlation curves for seismicity and hydraulic injection, different phases of well stimulation (see legend in individual panels). The lower panel shows the correlations of the seismic (upper) and hydraulic (middle) curves after subtracting the moving averages (drawn on the panels before subtraction).

5. Conclusions

In the presented doctoral thesis, we succeeded to create a functional methodology for automatic processing of seismic data from a dense network of surface receivers, detected and localized events could then be used to interpret the effect of hydraulic fracturing of bedrock. The whole procedure thus covers an important technical and legal topic of investigating possible material damage that could occur during stronger shocks caused by injection.

The first part of the processing, when the location of the focus was determined, proved to be very accurate, comparable to other methods, even for very weak seismic phenomena. The situation was slightly worse when determining the focal mechanism for such an earthquake. Here, an already weak seismic signal made it impossible to automatically determine a completely accurate focal mechanism. In addition, we must consider that our method of determining the mechanism used several simplifications, which lead to less accuracy of the result.

In the second part of the work – interpretation -- the correlation between seismic and hydraulic data was used to describe the response of the bedrock to hydraulic stimulation. This method has proven to be a simple and effective way of assessing the effect of grouting and determining any ongoing seismicity when activating the stress at the fracture. It can thus be part of today's popular "traffic light system" or hydraulic stimulation control systems, which have the task of monitoring seismicity and, with a higher risk of strong shocks, reducing grouting to prevent damage to property or human health.

6. Použitá literatura / References

Anikiev, D., Valenta, J., Stanek, F., Eisner, L., 2014. Joint location and source mechanism inversion of microseismic events: benchmarking on seismicity induced by hydraulic fracturing. *Geophysical Journal International*, Vol. 32, No. 5, pp. 59-65.

Bohnhoff, M., Rische, M., Meier, T., Becker, D., Stavrakakis, G., & Harjes, H. P. (2006). Microseismic activity in the Hellenic Volcanic Arc, Greece, with emphasis on the seismotectonic setting of the Santorini–Amorgos zone. *Tectonophysics*, 423(1-4), 17-33.

Bossu, R., Grasso, J.R., Plotnikova, L.M., Nurtaev, B., Fréchet, J. & Moisy M. (1996). Complexity of intracontinental seismic faultings: The Gazli, Uzbekistan, sequence. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86, 959–971.

Davis, S. D., & Frohlich, C. (1993). Did (or will) fluid injection cause earthquakes? Criteria for a rational assessment. *Seismological Research Letters*, 64(3-4), 207-224.

Gambino, S., Mostaccio, A., Patanè, D., Scarfi, L., & Ursino, A. (2004). High-precision locations of the microseismicity preceding the 2002–2003 Mt. Etna eruption. *Geophysical research letters*, 31(18).

House, L. (1987). Locating microearthquakes induced by hydraulic fracturing in crystalline rock. *Geophysical Research Letters*, 14(9), 919-921.

McGarr, A. & Simpson, D. (1997). A broad look at induced seismicity. In: *Rockbursts and Seismicity in Mines. Proceedings of the 4th International Symposium*, Krakow, Poland, 11-14 August 1997.

McGarr, A., Simpson, D. & Seeber, L. (2002), Case histories of induced and triggered seismicity: *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, Part 2*, edited by Lee, W.H.K., Kanamori, H., Jennings, P. & Kisslinger, C. (Eds.). *International handbook of earthquake & engineering seismology*, 81A, of *International Geophysics Series*: Elsevier, 647–665.

Rutledge, J. T., Phillips, W. S., & Mayerhofer, M. J. (2004). Faulting induced by forced fluid injection and fluid flow forced by faulting: An interpretation of hydraulic-fracture

microseismicity, Carthage Cotton Valley gas field, Texas. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(5), 1817-1830.

Sasaki, S. (1998). Characteristics of microseismic events induced during hydraulic fracturing experiments at the Hijiori hot dry rock geothermal energy site, Yamagata, Japan. *Tectonophysics*, 289(1-3), 171-188.

Stabile, T. A., Giocoli, A., Perrone, A., Piscitelli, S., Telesca, L., & Lapenna, V. (2015). Relationship between seismicity and water level of the Pertusillo reservoir (southern Italy). *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 56(4).

Staněk, F., Eisner, L., Moser, T. J. (2014). Stability of source mechanisms inverted from P-wave amplitude microseismic monitoring data acquired at surface, *Geophysical prospecting*, Vol. 62, Issue 3, pp. 475-490.

Viček, J., Fischer, T., & Vilhelm, J. (2016). Back-projection stacking of P-and S-waves to determine location and focal mechanism of microseismic events recorded by a surface array. *Geophysical Prospecting*, 64(6), 1428-1440.

Viček, J., Eisner, L., Stabile, T. A., & Telesca, L. (2018). Temporal Relationship Between Injection Rates and Induced Seismicity, *Pure and Applied Geophysics*, 175(8), 2821-2835.

West, M. E., Larsen, C. F., Truffer, M., O'Neel, S., & LeBlanc, L. (2010). Glacier microseismicity. *Geology*, 38(4), 319-322.

Životopis / Curriculum vitae

PERSONAL INFORMATION

Name, Surname	Josef Vlček
Address	
House number, street name, postcode, city, country	U Vysočanského pivovaru 3/701 19000, Praha, Czech Republic
Telephone	+420 724 162 630
E-mail	josef.vlcek@natur.cuni.cz
Nationality	Czech Republic
Place and Date of birth	Praha, 10.04.1987

WORK EXPERIENCE

Since 10/2011	Charles University in Prague, Faculty of Science, Department of Hydrogeology, Engineering Geology and Applied Geophysics - PhD student, Research geophysicist focused on seismology and CO ₂ flow measurements
Since 11/2015	Institute of Rock Structure and Mechanics, Czech Academy of Sciences - Research geophysicist focused on seismology and hydraulic fracturing

EDUCATION AND TRAINING

- | | |
|-------------|--|
| Since 2011 | Full-time Ph.D. student at Department of Hydrogeology, Engineering Geology and Applied Geophysics, Faculty of Science, Charles University in Prague
Thesis: Microseismic monitoring |
| 2009 – 2011 | M.Sc. in applied geophysics, Charles University in Prague, Faculty of Science
Thesis: Injection-induced seismicity: Statistic and energetic analysis |
| 2006 – 2009 | B.Sc. in geology, Charles University in Prague, Faculty of Science
Thesis: Geothermal energy resources – experience from the Soultz-sous-Forets project |

RESEARCH ACTIVITIES

Research sectors	<p>Seismology – automatic event location and focal mechanism estimation, magnitude of completeness estimation, spatial and temporal mapping of b-values and other statistical parameters</p> <p>CO₂ flow – measuring of the natural CO₂ flow using flowmeters, pressure and electrical methods, data processing and interpretation</p> <p>Seismological and microseismic data processing, CO₂ measurement device management and data processing</p>
My projects	<p>2016-2017, Grant Agency of Charles University, project "Monitoring of CO₂ in geodynamically active area of West Bohemia"</p>
Conference attendances	<p>- 26.-28.11.2012, AGIS workshop, Karlsruhe, poster: b-value mapping of injection-induced earthquakes and earthquake swarms. Vlček J., Fischer T., Dorbath C.</p> <p>- 11.-14.9.2013, AIM meeting, Třešť, poster: b-value mapping of injection-induced earthquakes and earthquake swarms. Vlček J., Fischer T., Dorbath C.</p> <p>- 25.-27.2.2014, SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition, Vienna, oral presentation: Automatic processing of Microseismic data: Determination of Hypocenter Position and Estimation of Focal Mechanism. Vlček J., Fischer T., Vilhelm J.</p> <p>- 27.4.-2.5.2014, EGU General Assembly, Vienna, poster: b-value mapping of injection-induced earthquakes and earthquake swarms. Vlček J., Fischer T., Dorbath C.</p>

- 3.-4.10.2014, 3rd Geothermal Workshop, Karlsruhe,
poster: Time reversal stacking of P and S waves to
determine location and focal mechanism of microseismic
events recorded during hydraulic stimulation, Vlček J.,
Fischer T., Vilhelm J.

- 10.-13.3.2015, Schatzalp Induced seismicity workshop,
Davos, poster: Time reversal stacking of P and S waves to
determine location and focal mechanism of microseismic
events recorded during hydraulic stimulation, Vlček J.,
Fischer T., Vilhelm J.

- 17.-22.4.2016, EGU General Assembly, Vienna, poster:
Carbon-dioxide flow measurement in geodynamically active
area of West Bohemia

- 12.-13.10.2017, 5th Geothermal workshop, Karlsruhe,
poster: Temporal relation between hydraulic injection and
induced seismicity, Vlček J., Fischer T., Eisner L.

Seznam publikací / List of publications

- **Viček, J.**, Fischer, T., & Vilhelm, J. (2016). Back-projection stacking of P-and S-waves to determine location and focal mechanism of microseismic events recorded by a surface array. *Geophysical Prospecting*, 64(6), 1428-1440.
- Hainzl, S., Fischer, T., Čermáková, H., Bachura, M., & **Viček, J.** (2016). Aftershocks triggered by fluid intrusion: Evidence for the aftershock sequence occurred 2014 in West Bohemia/Vogtland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(4), 2575-2590.
- Telesca, L., Eisner, L., Stabile, T. A., & **Viček, J.** (2017). Investigating the time clustering of induced microseismicity generated by hydraulic fracturing. *EPL (Europhysics Letters)*, 116(5), 59002.
- Wcislo, M., Eisner, L., Málek, J., Fischer, T., **Viček, J.**, & Kletetschka, G. (2018). Attenuation in West Bohemia: Evidence of High Attenuation in the Nový Kostel Focal Zone and Temporal Change Consistent with CO₂ Degassing. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- **Viček, J.**, Eisner, L., Stabile, T. A., & Telesca, L. (2018). Temporal relationship between injection rates and induced seismicity. *Pure and Applied Geophysics*, 175(8), 2821-2835.
- Wcislo, M., Eisner, L., Málek, J., Fischer, T., **Viček, J.**, & Kletetschka, G. (2020). Reply to "Comment on 'Attenuation in West Bohemia: Evidence of High Attenuation in the Nový Kostel Focal Zone and Temporal Change Consistent with CO₂ Degassing' by M. Wcislo, L. Eisner, J. Málek, T. Fischer, J. Viček, and G. Kletetschka" by MorozovReply. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(1), 375-380
- Fischer T., **Viček J.** and Lanzendorfer M. (2020). Monitoring crustal CO₂ flow: methods and their applications to the mofettes in West Bohemia. *Solid Earth*, <https://doi.org/10.5194/se-2020-6>